



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

2as Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos

**Faculdade de Ciências e Tecnologia da
Universidade de Coimbra**

3 de Junho de 2011

**Actas das Comunicações das 2as Jornadas de Segurança aos
Incêndios Urbanos**

João Paulo Correia Rodrigues

**Primeira edição
Junho, 2011**

Copyright © 2011 João Paulo C. Rodrigues

Nenhuma parte desta obra pode ser reproduzida sem autorização escrita do editor.

ISBN: 978-972-96524-5-5

Editado por:

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Rua Sílvio
Lima 3030-790, Coimbra. Portugal.

RESISTÊNCIA AO FOGO DE VIGAS PARCIALMENTE EMBEBIDAS COM BETÃO



Paulo A. G. Piloto*
Professor
Instituto Politécnico
Bragança, Portugal.



Ana B. R. Gavilán
Professora,
Universidad de
Salamanca, España.



Luís M. R. Mesquita
Professor
Instituto Politécnico
Bragança, Portugal.

SUMÁRIO

Neste artigo serão apresentados resultados dos ensaios de resistência ao fogo de elementos de viga parcialmente embebidos com betão. Os elementos de viga foram ensaiados à flexão, com aplicação de uma carga constante localizada a meio vão, submetida a uma curva de incêndio nominal ISO 834, [1-2]. Foram determinados os tempos de resistência ao fogo, as temperaturas críticas e os modos de colapso para cada grau de utilização.

Palavras-chave: Vigas parcialmente embebidas; Resistência ao fogo.

1. INTRODUÇÃO

Os elementos de vigas parcialmente embebidas com betão são elementos constituídos por perfis metálicos, revestidos com betão reforçado entre os banzos. A secção composta é responsável pelo aumento da rigidez à flexão e torção, sem aumento da dimensão da secção quando comparada com a secção do perfil. Para além destas vantagens, o betão reforçado é responsável pelo aumento da resistência ao fogo destes elementos.

Os elementos parcialmente embebidos com betão têm sido extensivamente testados à temperatura ambiente por diferentes investigadores [3-4], contudo o seu comportamento em condições de incêndio não se encontra totalmente investigado [5-6].

Neste artigo são apresentados resultados de ensaios de flexão, para determinação da resistência ao fogo de elementos de viga IPE 100 S275, revestidos parcialmente com betão reforçado C20/25, ver figura 1. Foram definidos três níveis de carga diferentes (40, 60 e 80%), em função do momento plástico da secção (M_{pl}), [7] e duas condições de ligação para os estribos (soldados-W e não soldados-NW). São ainda apresentados três ensaios realizados à temperatura ambiente, utilizando carga incremental.

* Autor correspondente – Departamento de Mecânica Aplicada. Instituto Politécnico de Bragança – Campus Santa Apolónia, Ap. 1134, 5301-857 Bragança. PORTUGAL. Telef.: +351 273 303157 Fax: +351 273 313051. e-mail: ppiloto@ipb.pt

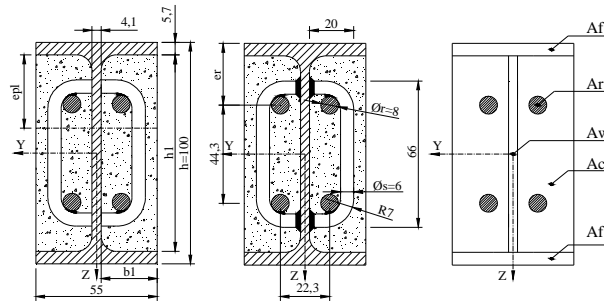


Figura 1: Dimensões da secção recta [mm] e notações.

O reforço longitudinal foi efectuado com barras de aço com diâmetro de 8 mm e estribos com barras de diâmetro de 6 mm, ambos com qualidade B500. A secção longitudinal destes elementos está representada na figura 2.

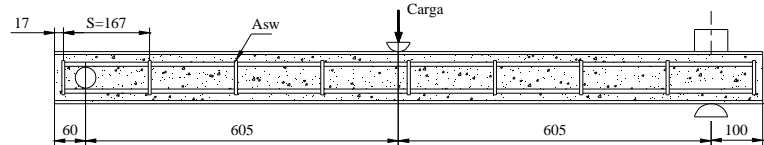


Figura 2: Corte longitudinal dos elementos de viga.

Os ensaios foram agrupados em cinco séries. No quadro 1 estão apresentadas as principais características dos elementos e das condições de ensaio.

Quadro 1: Identificação dos ensaios.

Série	Ensaio	Carga Térmica	Carga [%M _{pl}]	Estribos W - NW	Imperfeição, meio vão [-]
1	B/1.2-01	ISO834	40%	W	L/1210
	B/1.2-02	ISO834	40%	W	L/1210
	B/1.2-03	ISO834	40%	W	L/1210
2	B/1.2-04	ISO834	80%	W	L/1210
	B/1.2-05	ISO834	80%	W	-
	B/1.2-06	ISO834	80%	W	L/2420
3	B/1.2-07	ISO834	80%	NW	L/1210
	B/1.2-08	ISO834	80%	NW	L/807
	B/1.2-09	ISO834	80%	NW	L/2420
4	B/1.2-10	ISO834	60%	W	L/1210
	B/1.2-11	ISO834	60%	W	L/1210
	B/1.2-12	ISO834	60%	W	L/807
5	B/1.2-13	Amb.	Incremental	W	L/1210
	B/1.2-14	Amb.	Incremental	W	-
	B/1.2-15	Amb.	Incremental	W	L/1210

Nos ensaios de resistência ao fogo é estudado o comportamento térmico e mecânico destes elementos, apresentando resultados das medições efectuadas para as temperaturas e para os deslocamentos em diferentes secções. As séries 2 e 3 permitem comparar o efeito da ligação dos estribos, enquanto que as séries 1, 2 e 4 permitem avaliar o efeito do grau de utilização. Nos ensaios de resistência à temperatura ambiente (série 5) é estudado o comportamento mecânico, apresentando resultados das medições de força e dos deslocamentos a meio vão.

2. ENSAIOS DE RESISTÊNCIA AO FOGO

Os ensaios de resistência ao fogo foram realizados, de acordo com as normas de ensaio específicas para este tipo de elemento, [1], nos laboratórios do Instituto Politécnico de Bragança. Os ensaios foram realizados num pequeno forno de resistência de 360 [KW], com quatro queimadores, com funcionamento a gás. Foi ainda utilizado um pórtico de reacção para utilização da carga mecânica, ver figura 3.

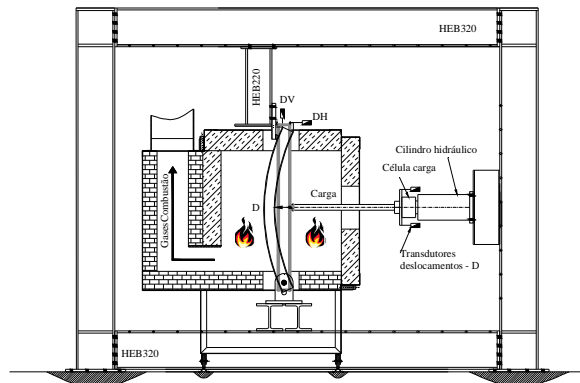


Figura 3: Representação esquemática dos ensaios.

Os ensaios de resistência ao fogo servem para avaliar o comportamento de qualquer elemento de construção e em particular estes elementos. O método de ensaio permite quantificar a capacidade do elemento suportar o valor da acção mecânica quando submetido a temperaturas crescentes, utilizando um critério específico para definir o estado limite último. O valor da resistência ao fogo pode ser expresso no domínio do tempo ($t_{fi,d}$ – valor de resistência ao fogo em minutos completos) ou no domínio da temperatura ($\theta_{cr,d}$ – Temperatura crítica), correspondente ao estado limite último. Os ensaios tiveram duração distinta, em função da capacidade demonstrada pelo elemento para manter a carga.

Nas secções seguintes é apresentada a preparação dos elementos e os resultados dos ensaios.

2.1 Preparação dos elementos

Estes elementos foram betonados no laboratório em duas fases, sem necessidade de utilização de cofragens, com um intervalo de 7 dias. Os ensaios foram realizados após 60 dias da primeira betonagem.

A superfície dos materiais não teve qualquer tratamento especial, devendo ser considerada no estado normal dos fornecedores. Os reforços foram soldados aos estribos e à alma do perfil pelo processo MAG (caso W), e atados com arame aos estribos (caso NW).

As propriedades mecânicas dos materiais envolvidos (aço do perfil, aço do reforço e betão) foram determinadas de acordo com as normas de ensaio definidas para cada material. Estes ensaios foram realizados à tracção e à compressão, utilizando três amostras representativas. Os resultados médios estão apresentados no quadro 2.

Quadro 2: Propriedades mecânicas dos materiais.

Material	Propriedades	Tensão de cedência (fy)	Tensão última (fu)
Perfil	ReH [MPa] (fy) / Rm (fu)	302.466±5.749	431.252±5.020
Reforço	ReH [MPa] (fy) / Rm (fu)	531.508±7.908	626.574±11.539
Betão	f _{ck,cube} [MPa]	-	21.45±1.03

Foram definidas 3 secções para controlo da temperatura em cada elemento, utilizando cinco termopares tipo K para cada secção S1 / S3 e seis termopares para a secção S2, ver figura 4.

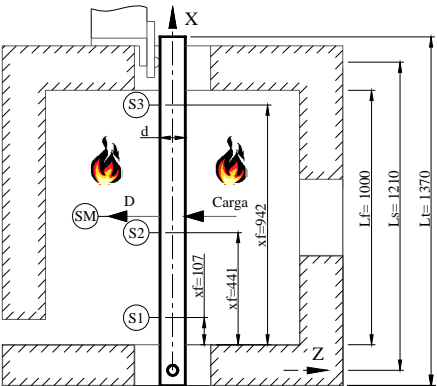


Figura 4: Identificação das secções S1-S3 (dimensões em mm).

Na figura 4 está representada a posição do elemento dentro do forno. A distância entre apoios “Ls” foi considerada igual a 1.21 m, o comprimento de exposição ao fogo “Lf” foi 1.0 m e o comprimento total do elemento “Lt” igual a 1.37 m. O apoio inferior apresenta restrições ao deslocamento nas direcções Z/Y e restrições à rotação nas direcções Z/X. O apoio superior apresenta restrições ao deslocamento nas direcções Z/Y e restrições à rotação na direcção X.

Alguns termopares foram soldados directamente no perfil (Si-FS, Si-OS, Si-WS) e nos reforços (Si-RS), enquanto que outros foram soldados em pequenas porcas de aço, embebidas nas posições definidas para medição da temperatura do betão (Si-IC e Si-OC), ver figura 5.

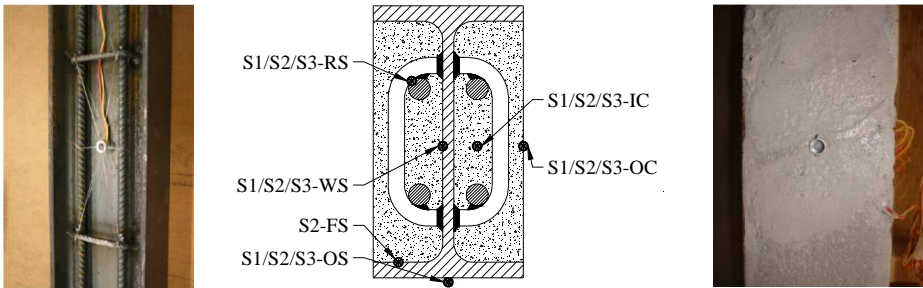


Figura 5: Posição dos termopares nas secções S1/S2/S3.

A aquisição da temperatura em cada ponto (junção) foi efectuada com uma frequência de 2 [Hz], enquanto que a temperatura do forno (termopar de placa) foi medida com uma frequência de 0.5 [Hz].

2.2 Critério de resistência

O critério utilizado para definir o Estado Limite Último (ELU) foi determinado de acordo com a norma de ensaio [1]. Este critério permite classificar a capacidade resistente do elemento (classificação R), independentemente do modo de colapso atingido. A resistência ao fogo foi definida como o tempo transcorrido desde o instante em que iniciou o aquecimento e o instante em que o elemento deixou de ter capacidade para suportar a carga imposta. Este critério foi definido com base nas medições efectuadas para o deslocamento máximo verificado no elemento de viga (D) e nos cálculos efectuados para a taxa de variação do deslocamento (dD/dt). O ELU foi considerado quando ambos os parâmetros (D e dD/dt) excederam o valor limite, eq. 1.

$$\begin{aligned} D &= L^2 / 400 d \quad [mm] \\ dD/dt &= L^2 / 9000 d \quad [mm/min] \quad (D \geq L/30) \end{aligned} \quad (1)$$

A aplicação deste critério permite determinar o tempo de resistência ao fogo ($t_{fi,d}$) e o valor da temperatura crítica do elemento ($\theta_{cr,d}$).

2.3 Comportamento térmico

A curva nominal de incêndio foi utilizada para provocar o aquecimento dos elementos. As temperaturas foram registadas nas 3 secções distintas, S1-S3, para verificar a homogeneidade deste processo. A máxima diferença de temperatura crítica registada entre as secções e a temperatura média do elemento foi inferior a 3.2% para os ensaios da série 1. Para os restantes ensaios, séries 2-4, este resultado foi inferior a 5.1, 6.3 e 11.2%, respectivamente. Estes resultados permitem concluir que a variação da temperatura no comprimento do elemento não foi muito significativa.

A temperatura registada em cada secção não é uniforme, verificando-se uma diferença de 150 °C entre os valores medidos no exterior da secção e os valores registados no interior, definindo duas evoluções distintas, conforme se pode comprovar nos resultados das figuras 6-9. Nestas figuras estão representados os todos os valores das temperaturas registadas pelos termopares da secção S2 e os valores intermédios das secções de cada elemento, com incrementos de 5 minutos, até se atingir o ELU.

A temperatura crítica foi determinada para cada material, utilizando um valor médio ponderado com influência da área de cada registo. Os valores T_{is} , T_{ic} e T_{ir} representam o valor da temperatura no perfil, no betão e no reforço, definidos para cada secção S_i ($i=1,2,3$), tendo sido determinados de acordo com eq. 2.

$$\begin{aligned} T_{is} &= (2A_f (SiOS) + A_w (SiWS)) / (2A_f + A_w) \\ T_{ic} &= [1/4A_c (SiIC) + 3/8A_c (SiIC + SiOC) + 3/8A_c (SiIC + SiOS)] / (A_c) \\ T_{ir} &= SiRS \end{aligned} \quad (2)$$

A_f representa o valor da área do banzo, A_w representa o valor da área da alma, A_c representa o valor da área do betão, A_r o valor da área do reforço e A_t representa o valor da área total da secção recta, ver figura 1.

A temperatura crítica de cada secção foi determinada através da eq. 3 e a temperatura crítica do elemento, $\theta_{cr,d}$, obtida pela média ponderada do valor da temperatura crítica de cada secção, eq. 4

$$TS_i = [T_{is}(A_w + 2A_f) + T_{ic}(A_c) + T_{ir}(A_r)] / A_t \quad (3)$$

$$\theta_{cr,d} = [TS_1 + 2TS_2 + TS_3] / 4 \quad (4)$$

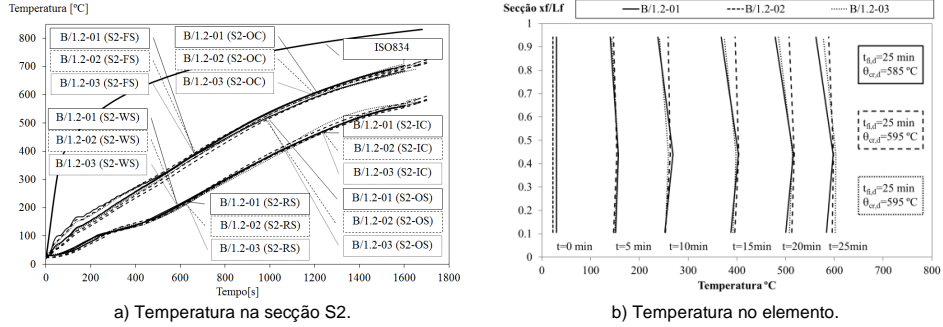


Figura 6: Comportamento térmico da série 1.

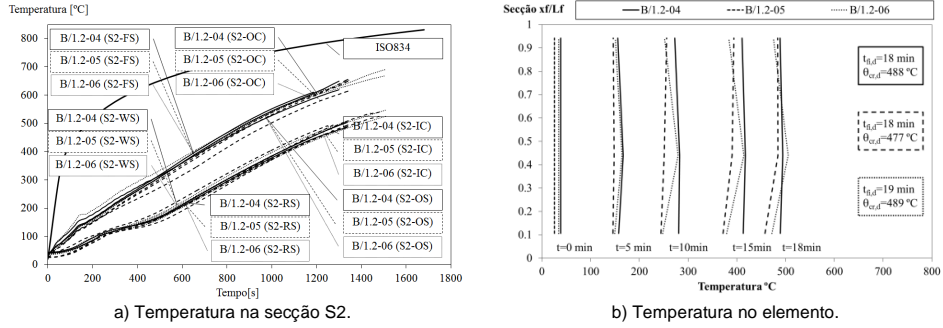


Figura 7: Comportamento térmico da série 2.

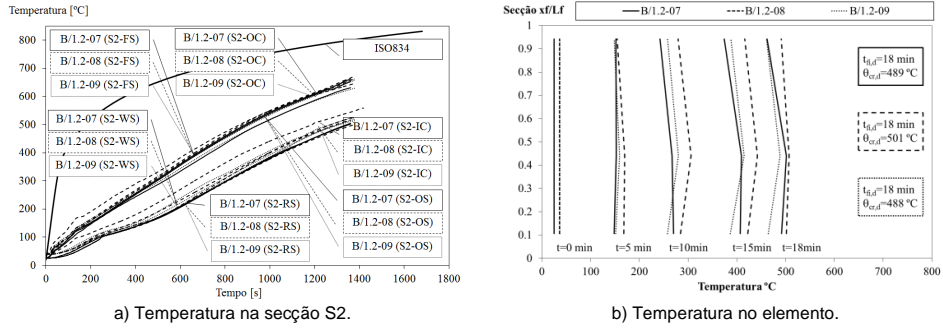


Figura 8: Comportamento térmico da série 3.

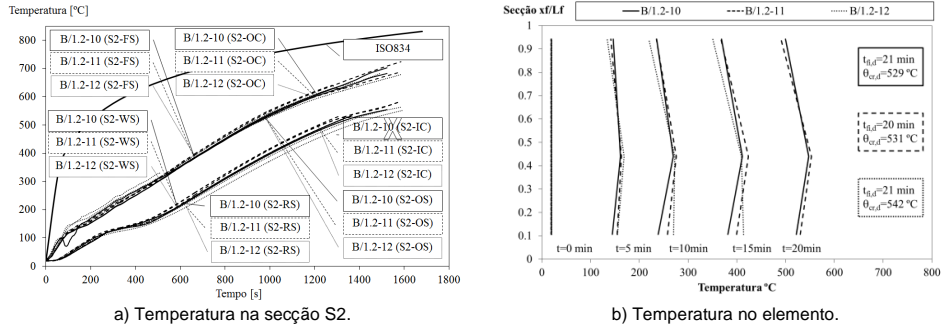


Figura 9: Comportamento térmico da série 4.

A temperatura registada no exterior é sempre superior ao valor da temperatura registada no interior. A oscilação inicial no perfil da temperatura é proporcionada pelo nível de humidade existente no betão. O ensaio B/1.2-09 apresentou maiores fissuras no betão, comparativamente com os ensaios realizados na série 2, motivo pelo qual se registou maior valor da temperatura no interior do elemento.

Nas secções S1 e S3 foram registadas evoluções de temperatura semelhante, mas com valores médios inferiores. Esta pequena variação está relacionada com o isolamento utilizado nos apoios, ver figuras 6-9 b).

A temperatura crítica do reforço apresenta o menor valor da secção. A resistência ao fogo diminui com o aumento do grau de utilização.

2.4 Comportamento mecânico

Esta secção analisa a variação do deslocamento transversal, registado na secção média de cada elemento, representando a medição desde o início do processo de aquecimento. Esta posição corresponde ao local onde o deslocamento máximo é esperado, sendo utilizada para caracterizar a resistência ao fogo.

O sistema de carga manteve o valor da força quase constante, com variação máxima de $\pm 5\%$. Os valores das forças aplicadas em cada série correspondem a uma percentagem do momento plástico da secção (40% = 18252.9 N, 60 % = 27379.3 N e 80 % = 36505.8 N).

A taxa de variação do deslocamento foi calculada a partir das medições do deslocamento transversal, durante o período do ensaio.

O sistema de aquisição, utilizado para a medição do deslocamento e da força, utilizou uma frequência de recolha de dados igual a 0.5 [Hz].

Nas figuras 10-13 está representada a variação do deslocamento transversal (D). Este valor aumenta de uma forma linear com a duração do incêndio, para pequenos valores de taxa de deslocamento (dD/dt). O critério do deslocamento, definido na eq. 1, foi o primeiro a ser ultrapassado. O critério da taxa de deslocamento foi determinante para calcular a resistência ao fogo, por influência da condição de aplicabilidade ($L/30$). A resistência ao fogo foi calculada quando ambos os critérios foram ultrapassados.

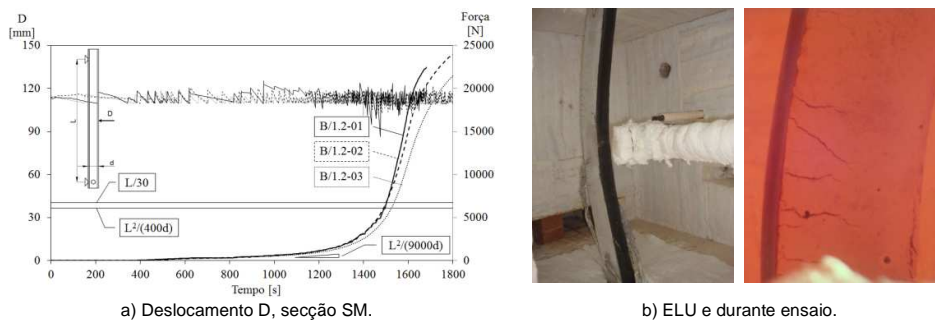


Figura 10: Comportamento mecânico da série 1.

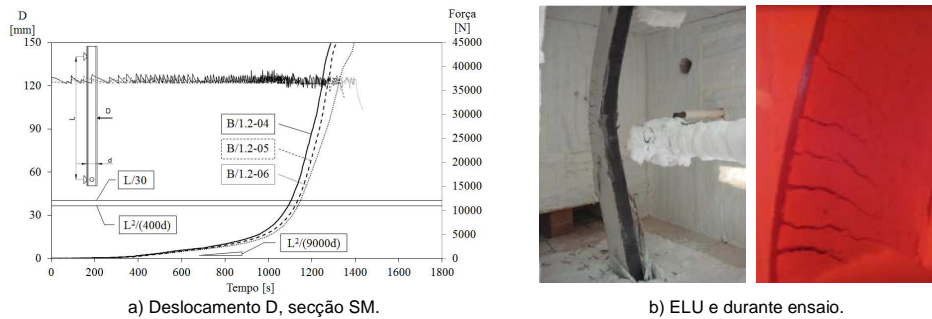


Figura 11: Comportamento mecânico da série 2.

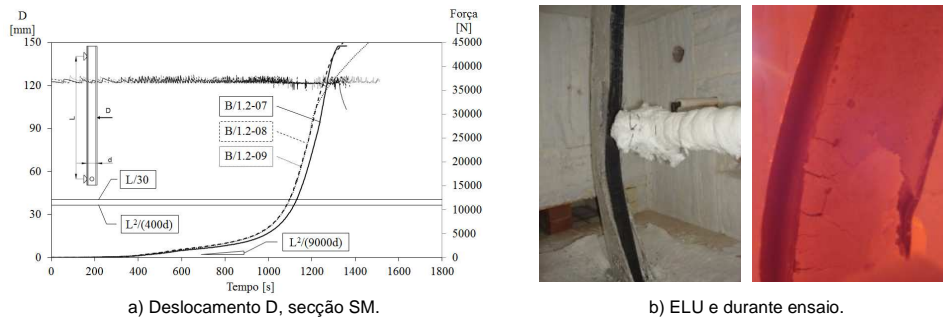


Figura 12: Comportamento mecânico da série 3.

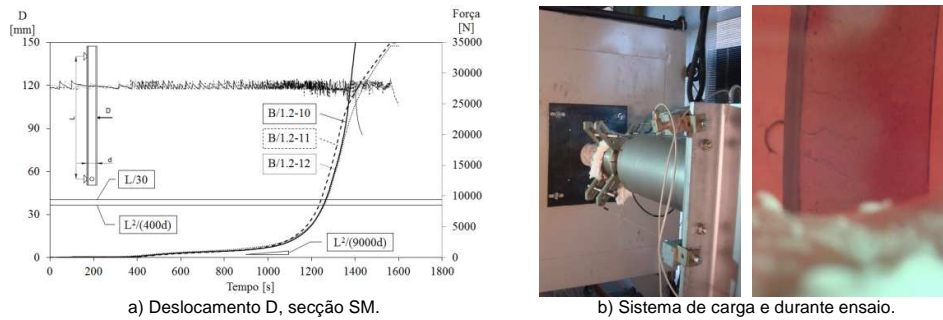


Figura 13: Comportamento mecânico da série 4.

Os modos de colapso foram semelhantes para todos os ensaios da série 1. Todos os elementos atingiram o ELU com formação de uma rótula plástica. O parâmetro taxa de deslocamento atingiu o seu valor limite para o instante de tempo $t=20$ minutos, no entanto sem verificar o critério de resistência. A resistência ao fogo destes ensaios foi exactamente igual, $t_{fi,d}=25$ minutos.

Os elementos de viga utilizados nos ensaios da série 2 atingiram o ELU por instabilidade lateral torsional. O parâmetro taxa de deslocamento foi excedido para o instante de tempo $t=13$ minutos, no entanto sem verificar o critério de resistência. A resistência ao fogo foi de $t_{fi,d}=18$ minutos para os ensaios B/1.2-04 e B/1.2-05 e de $t_{fi,d}=19$ minutos para o ensaio B/1.2-06.

A resistência ao fogo foi determinada para diferentes condições de ligação dos estribos. Os ensaios da série 3 diferem dos ensaios da série 2 pelo facto dos estribos não se encontrarem soldados. A resistência ao fogo foi semelhante nos três ensaios, $t_{fi,d}=18$ minutos. A temperatura crítica foi semelhante ao valor da temperatura crítica determinada nos resultados da série 2, não se verificando qualquer influência provocada pelos maiores

movimentos relativos dos blocos de betão ou pelos maiores valores das temperaturas registadas no interior dos elementos.

Os ensaios realizados na série 4 apresentaram um modo de colapso por formação de rótula plástica. O parâmetro taxa de deslocamento foi excedido para o instante de tempo $t=16$ minutos, também sem verificação do critério de resistência. A resistência ao fogo foi superior, com valores de $t_{fi,d}=20$ minutos para os ensaios B/1.2-10 e B/1.2-12, enquanto que para o ensaio B/1.2-11 o valor foi $t_{fi,d}=21$ minutos.

A degradação progressiva do betão armado foi verificada em todos os ensaios realizados, provocada pela deformação excessiva sofrida por este material. As maiores fissuras foram consequência do estado de tracção imposto pela solicitação de flexão e pelo movimento de separação do betão em relação ao perfil. Os blocos de betão dos ensaios da série 3 apresentaram maior movimento na direcção Y, conforme esperado.

3. ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À TEMPERATURA AMBIENTE

Os ensaios de resistência à flexão, realizados à temperatura ambiente, foram efectuados nas mesmas condições das séries anteriores. Os elementos foram posicionados no mesmo pórtico de reacção, utilizando um sistema de carga incremental, com valor de 5000 [N]. A carga foi aplicada através de um cilindro hidráulico, com uma extensão em aço. O deslocamento transversal (D) foi medido a meio vão, de forma idêntica aos anteriores, através de uma média de quatro transdutores de deslocamento.

3.1 Preparação dos elementos

Os elementos de viga parcialmente embebidos com betão foram instrumentados com extensometria eléctrica. Estes sensores foram colocados na superfície média dos elementos (SM), para medição da deformação no aço, em duas posições (SM-WS, SM-FS). Dois extensómetros adicionais foram posicionados no interior do betão armado (SM-RC1, SM-RC2), assumindo uma adesão perfeita entre o reforço e o betão, ver figura 14. Para colocação destes últimos foi necessário efectuar a maquinagem dos varões do reforço. Todos os extensómetros foram protegidos com verniz e uma massa especial para protecção da humidade, da água e do contacto mecânico.

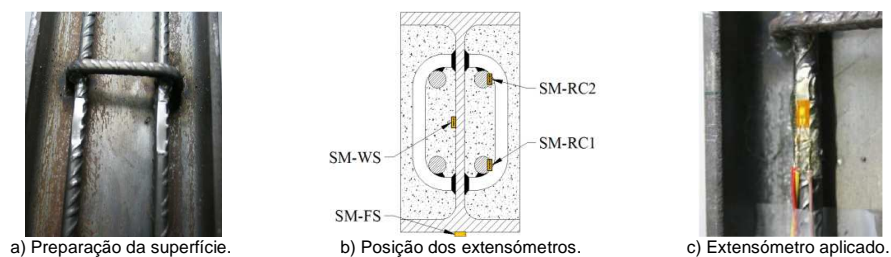


Figura 14: Extensometria eléctrica na secção SM.

3.2 Critério de resistência

Para os ensaios de resistência à flexão foi utilizado o critério de deslocamento, definido na equação 2. O estado limite último, dos ensaios da série 5, foi determinado por um modo de instabilidade, encurvadura lateral torsional.

3.3 Comportamento mecânico

O deslocamento transversal (D) foi medido a meio vão, com variação imposta pelo sistema de carga incremental. Os resultados dos ensaios desta série são semelhantes, conforme se poderá observar pela figura 15. A relação entre a força aplicada e o deslocamento é linear numa primeira fase, seguido por duas fases distintas com comportamento não linear.

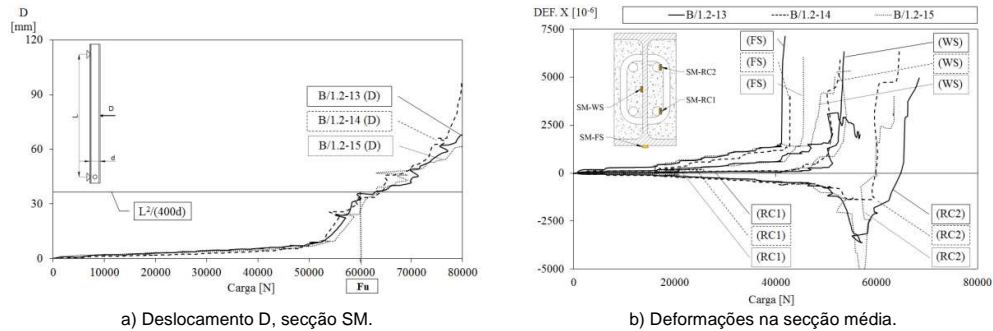


Figura 15: Comportamento mecânico da série 5.

Todas as deformações medidas são positivas, com excepção das medições efectuadas na posição SM-RC2. Estas últimas medições confirmam o valor da resistência última dos elementos (F_u), com alteração significativa do valor algébrico das medições.

4. CONCLUSÕES

Neste artigo foi determinada a resistência ao fogo de doze elementos parcialmente embebidos com betão reforçado. Foram definidas quatro séries, para três graus de utilização (40, 60, e 80%) e para duas condições de ligação dos estribos (soldados e não soldados). A resistência ao fogo diminui progressivamente (25, 21, 18 min) com o aumento do grau de utilização (40, 60, 80 %). Verificaram-se dois tipos distintos de modo de colapso para o ELU. Para as séries 2 e 3 (80%), os elementos atingiram o ELU por encurvadura lateral torsional. Para as restantes séries (40 e 60%) os elementos atingiram o ELU com formação de uma rótula plástica. Não se verificou qualquer evidência do efeito da ligação mecânica dos estribos na resistência ao fogo. Em ambas as séries (2 e 3) foi determinado um valor de resistência ao fogo de 18 minutos, com excepção do ensaio B/1.2-06 com um valor de 19 minutos. As diferenças de temperatura entre as secções S1, S2, S3 e o valor da temperatura média do elemento foram inferiores a 10%, provando que o aquecimento foi aproximadamente homogéneo ao longo do comprimento exposição ao fogo e ainda a eficiência do isolamento nos apoios. A temperatura do reforço representa o valor mínimo registado nas secções. Em todos os ensaios foram registadas evoluções da temperatura semelhantes, demonstrando que a temperatura não é uniforme na secção. O comportamento mecânico destes elementos também foi verificado à temperatura ambiente. O deslocamento transversal apresenta uma evolução linear para baixas taxas de deslocamento, seguida de uma evolução não linear, com incremento significativo na taxa de deslocamento.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às empresas: Arcelor – Mittal (Espanha), J. Soares Correia (Portugal), Fepronor (Portugal) e Hierros Furquet (Espanha).

6. REFERÊNCIAS

- [1] CEN/TC 127, EN 1363-1, "Fire resistance tests, part 1- General requirements"; *European standard*, English version, 1999.
- [2] TC 92/SC 2, ISO 834 -1, "Fire-resistance tests - Elements of building construction - Part 1: General requirements", *International standard*, English version 1999.
- [3] R. Kindmann, R. Bergmann, L. -G. Cajot, J. B. Schleich; "Effect of reinforced concrete between the flanges of the steel profile of partially encased composite beam"; *Journal of Constructional Steel Research*, 27, 1993, pp. 107-122.
- [4] R. Maquoi, C. Heck, V. Ville de Goyet, et al, (European commission), "Lateral torsional buckling in steel and composite beams"; ISBN 92-894-6414-3; *Book 1,2 and 3; Technical steel research final report EUR 20888 EN*; August 2002.
- [5] Akio Kodaira, Hideo Fujinaka, Hirokazu Ohashi and Toshihiko Nishimura; "Fire Resistance of Composite Beams Composed of Rolled Steel Profile Concreted Between Flanges"; *Fire Science and Technology*, Vol.23 No.3, 2004, pp. 192-208.
- [6] António J.P. Moura Correia, João Paulo C. Rodrigues, "Fire resistance of partially encased steel columns with restrained thermal elongation", *Journal of Constructional Steel Research*, Volume 67, Issue 4, pp. 93-601, April 2011.
- [7] CEN, EN 1994-1-1; "Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings"; *European standard*, English version, Brussels, December 2004.